第 37 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.37,No.7
2017 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511232368
韩慧莹,殷秀琴,寇新昌.长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应.生态学报,2017,37(7):2197-2205.
Han H Y,Yin X Q, Kou X C.Community characteristics of soil fauna in the low-mountain of the Changbai Mountains and its respond to the change of environmental factors.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2197-2205.

长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应

韩慧莹[1],殷秀琴[1,2,*],寇新昌[1]
1 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024
2 吉林省动物资源保护与利用重点实验室, 长春 130024

摘要:为探讨长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应,分别于 2014 年春季(5 月)、夏季(7 月)及秋季(9 月)对长白山地低山区的次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林、蒙古栎林和耕地土壤动物进行研究。研究表明,4 个生境共获土壤动物 58 类,30445 只,隶属 3 门 6 纲 22 目 52 科(亚目)。各生境大型、中小型土壤动物具有一定的差异性,且各生境季节变化不同。总体来看,耕地生境土壤动物密度与类群数明显低于其它 3 个生境,大型土壤动物的密度季节变化较显著,中小型土壤动物的密度和类群数的季节波动均较大。次生落叶阔叶林生境大型、中小型土壤动物群落多样性指数和丰富度指数均高于其它 3 个生境,耕地最低。中小型土壤动物多样性指数、丰富度指数季节波动较大,春季、夏季与秋季之间差异性较大,大型土壤动物季节波动较小。通过对大型、中小型土壤动物与 13 种环境因子进行 Pearson 相关分析可知,大型土壤动物对土壤温度和土壤湿度具有正向响应,其密度、类群数与土壤温度具有显著正相关关系,中小型土壤动物的密度、类群数对土壤湿度具有显著正向响应;土壤动物对 pH 的响应程度较低,对有机质具有显著正向响应;土壤动物对全效养分 N、P、K 的响应程度高,大型土壤动物的密度对速效养分 N、P、K 的响应程度高,中小型土壤动物类群数对速效养分 N、P、K 的响应程度高,对 Ca、Mg 的响应程度较低。

关键词:土壤动物;多样性特征;环境因子;响应;长白山地

Community characteristics of soil fauna in the low-mountain of the Changbai Mountains and its respond to the change of environmental factors

HAN Huiying[1], YIN Xiuqin[1,2,*], KOU Xinchang[1]
1 *School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*
2 *Jilin Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Changchun* 130024, *China*

Abstract: The soil fauna community characteristics of the lower Changbai Mountains were investigated, as well as their response to changes in environmental factors. Soil fauna from four habitats, including the secondary boreonemoral zone, secondary deciduous broad-leaf forest, Mongolia oak forest, and farmland in Changbai low-mountain area, were studied in the spring (May), summer (July) and fall (September) of 2014. Overall, 30445 individuals were captured. These belonged to 3 phyla, 6 classes, 22 orders, and 52 families. The soil fauna density and their group numbers differed among the habitats with seasonal fluctuations. The structure of the farmland soil fauna community was the simplest among all habitats. Seasonal fluctuations of macro-fauna density were high. For micro-fauna, both the seasonal fluctuation in density and group numbers were high. The biodiversity analyses showed that in these biotopes, the soil fauna community in the

基金项目:国家自然科学基金项目(41471211)
收稿日期:2015-11-23; **网络出版日期**:2016-08-30
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yinxq773@nenu.edu.cn

secondary deciduous broad-leaf forest has the highest diversity and richness indices. In contrast, the diversity and richness indices were the lowest in the farmland habitat. Seasonal fluctuations in diversity and richness indices were high for micro-fauna. The differences in these indices between spring, summer, and fall were apparent, although less profound for the macro-fauna. Using Pearson correlation analyses between the macro- or micro-fauna and 13 soil environmental factors, we showed that the response of macro-fauna to soil temperature and soil humidity was positive. Especially the macro-fauna density and soil temperature have an obvious positive correlation, as well as the micro-fauna density and group number and soil temperature. Furthermore, the response of soil fauna to pH was weak, but soil fauna and organic matter had an obvious positive correlation. Finally, the response of soil fauna to Total nitrogen, total phosphorus and total potassium was strong, as well as the response from macro-fauna to available N, P, and K. Finally, the relationship between micro-fauna group number and available N, P, and K was strong, but weaker for Ca and Mg, and with a highly negative correlation to Mn.

Key Words: soil fauna; characteristics of diversity; environmental factors; response; Changbai Mountains

土壤生态系统是由土壤、生物及环境要素3个层次构成的、物质流与能量流所贯穿的开放性系统,土壤动物作为该系统中最活跃的组成部分与环境因子之间相互作用更为复杂密切[1-3]。环境因子对土壤动物具有强烈的影响,即环境因子细微的变化也可能影响土壤动物的多样性及其功能[4-6],并且各种环境因子并不是单独作用于土壤动物,而是交互作用共同影响土壤动物的多样性[1,7-8]。土壤动物对环境变化也十分敏感,土壤动物的种类与数量、生物量、组成结构与生态分布均可稳定、综合的响应各环境因子的变化,并具有一定的生物指示作用[9-10]。

目前国内外关于土壤动物与环境因子关系的研究,多为土壤动物与单一或少数几种环境因子的研究[11-15],而土壤动物对环境多因子的响应研究较少,尤其是关于长白山低山区土壤动物对环境多因子的响应研究,因此本文对长白山地低山区次生针阔叶混交林(生境Ⅰ)、次生落叶阔叶林(生境Ⅱ)、蒙古栎林(生境Ⅲ)、耕地(生境Ⅳ)土壤动物与环境多因子(土壤温度、土壤湿度、pH、有机质、全效养分、速效养分、矿质元素)进行研究,探讨长白山低山土壤动物对不同环境的响应,为完善长白山森林生态系统的研究及长白山地森林资源的保护提供科学依据。

1 研究区自然概况

本研究区位于吉林省东部的蛟河市(43°38′N—43°40′N,127°35′E—127°37′E),地处长白山西麓,地貌以低山为主,海拔多在500m以上。属于北温带大陆性季风气候,年平均气温3.4℃,多年平均降水量为758mm,主要集中在夏季。地带性土壤为山地暗棕壤,腐殖质含量高,表层一般呈微酸性。植被属于长白山植物区系,群落结构复杂。各生境基本特征见表1。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

选取长白山地低山区的4个生境作为研究样地,于2014年的春季(5月)、夏季(7月)和秋季(9月)进行取样。首先用GPS测定样地的地理位置与海拔,在次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林、蒙古栎林3个生境内设20m×20m样地,耕地生境内设5m×5m样地,每个样地内按对角线法选取5个样方作为重复样(在样地内设小重复),大型土壤动物取样面积为25cm×25cm,中小型土壤动物为10cm×10cm,按凋落物层、0—5cm、5—10cm、10—15cm土层采集样品,大型土壤动物采用手捡法,中小型采用Tullgren法分离,土壤动物一般鉴定到科,个别鉴定到目(亚目)。各生境每个样方的各层取适量土样用于土壤理化性质的测定。在野外同时利用土壤水分温度自动监测系统测定土壤温度和土壤湿度。

将带回的土壤样品风干处理后进行研磨,用常规方法测定pH、有机质含量、全效养分(N、P、K)、速效养

分(N、P、K)以及全钙(Ca)、全镁(Mg)和全锰(Mn)的含量。

表 1　长白山地低山区各生境基本特征

Table 1　Basic characteristics of four habitats in Changbai Mountains

生境 Habitats	地理坐标 Geographic Coordinates	海拔/m Altitude	长白山低山区植物特征 Plant feature of Changbai Mountains
Ⅰ	43°40′N,127°35′E	510	主要乔木有:红松、蒙古栎、紫椴、花曲柳、千金鹅尔枥;主要灌木有:青楷槭、东北山梅花、榛、瘤枝卫矛、绣线菊、簇毛槭;主要草本有:苔草、小叶芹、蕨
Ⅱ	43°39′N,127°37′E	505	主要乔木有:色木槭、山杨、白桦、紫椴、千金鹅尔枥;主要灌木有:刺五加、瘤枝卫矛、忍冬、青楷槭;主要草本有:苔草
Ⅲ	43°40′N,127°36′E	518	主要乔木有:蒙古栎;主要灌木有:胡枝子;主要草本有:羊胡子苔草
Ⅳ	43°38′N,127°35′E	465	种植作物为玉米

生境Ⅰ,次生针阔叶混交林, Secondary coniferous and broadleaved mixed forest;生境Ⅱ,次生落叶阔叶林, Secondary deciduous broad-leaf forest;生境Ⅲ,蒙古栎林,Mongolie oak forest;生境Ⅳ,耕地,Farmland;红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)、千金鹅尔枥(*Carpjnus turczaninowii*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、榛(*Corylus heterophylla*)、瘤枝卫矛(*Euonymus verrucosus*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、簇毛槭(*Acer barbinerve*)、苔草(*Carex tristachya*)、小叶芹(*Aegopodium alpestre*)、蕨(*Pteridophytes*)、色木槭(*Acer mono*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、羊胡子苔草(*Carex tristachya*)

2.2　数据统计与处理

采用 Shannon-Winener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数计算各生境土壤动物群落的多样性特征。数据统计分析使用 SPSS19 分析软件处理;各生境土壤动物间差异用 One-way ANOVA 分析;应用 Pearson 相关分析探讨土壤动物与各环境因子间的关系。

3　结果与分析

3.1　土壤动物类群和数量组成特征

调查结果显示,在 4 个生境共获得土壤动物 58 类,30445 只,隶属 3 门 6 纲 22 目 52 科(亚目)。共获得大型土壤动物 52 类,1663 只,占总密度的 5.46%。优势类群 3 类,即蚁科(29.1%)、线蚓科(18.4%)和正蚓科(12.33%);马陆目、石蜈蚣科、地蜈蚣科、叩甲科、叩甲科幼虫、隐翅虫科、隐翅虫科幼虫、鳞翅目幼虫、双翅目幼虫、漏斗蛛科为该地区的常见类群,占总密度的 28.08%;优势类群和常见类群构成了长白山地低山区大型土壤动物的主体。其余 38 类土壤动物为稀有类群,个体数量较少,其中鞘翅目幼虫、近管蛛科以及金龟子科占稀有类群个体密度前 3 位。经显著性检验:耕地生境大型土壤动物的密度显著低于其它 3 个生境,各生境间类群数的差异性不显著。

获得中小型土壤动物 45 类,共 28782 只,与大型土壤动物相比,虽然类群数较少,但是在数量上占绝对优势。甲螨亚目(42.35%)、辐螨亚目(11.67%)和等节跳虫科(23.34%)为优势类群,其中甲螨亚目是的数量最多且分布最广泛。革螨亚目、球角跳虫科、长角跳虫科和山跳虫科为常见类群,占中小型土壤动物总密度的 18.09%。其余类群为稀有类群,其中鳞跳虫科、双翅目幼虫和圆跳虫科占稀有类群个体密度前 3 位。经显著性检验,耕地生境中小型土壤动物类群数显著低于其它生境,各生境密度差异性不显著。

3.2　土壤动物群落结构特征及其动态

3.2.1　土壤动物群落水平分布特征及其动态

春季,耕地大型土壤动物密度最低,蒙古栎林中小型土壤动物的密度最高;夏季,次生落叶阔叶林和蒙古栎林大型土壤动物的密度显著高于耕地($P<0.05$),各生境中小型土壤动物的密度差异不大;秋季,耕地大型土壤动物的密度显著低于其它 3 个生境($P<0.05$)(图 1)。春季和夏季,耕地大型、中小型土壤动物类群数均显著低于其它 3 个生境($P<0.05$);秋季,次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林大型土壤动物的密度显著高于耕地($P<0.05$),耕地中小型土壤动物的密度最低(图 2)。总体看来,耕地生境大型、中小型土壤动物密度与

类群数明显低于其它 3 个生境。

各生境大型土壤动物密度、类群数季节动态为：次生针阔叶混交林、耕地大型土壤动物密度季节动态不显著，次生落叶阔叶林、蒙古栎林大型土壤动物密度季节动态显著（P<0.05），秋季最低。次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林和蒙古栎林大型土壤动物类群数季节差异性不大；耕地大型土壤动物类群数 5 月显著高于 7 月（P<0.05）（图 1）。从上述季节动态趋势可以看出，次生针阔叶混交林大型土壤动物的密度和类群数季节动态不显著，蒙古栎林大型土壤动物的密度和类群数季节变化规律一致，7 月份均达到最高值，而 9 月份为最低值，密度季节性差异较显著；耕地大型土壤动物的密度季节波动不大，类群数春季显著高于夏季。

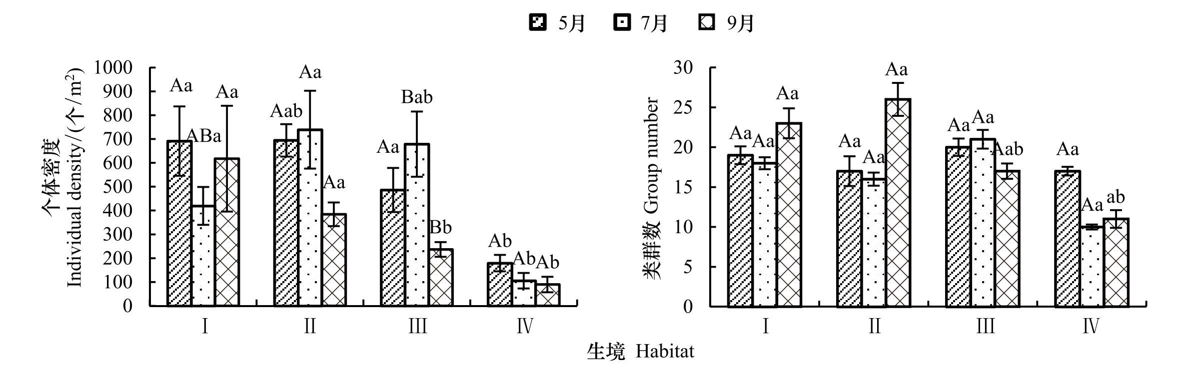


图 1 各生境大型土壤动物密度与类群数动态

Fig.1 Dynamics of group number and density of macro soil fauna in different habitats

小写字母表示同一月份不同生境间的差异，大写字母表示同一生境的不同月份间的差异，生境Ⅰ为次生针阔混交林、生境Ⅱ为次生落叶阔叶林、生境Ⅲ为蒙古栎林、生境Ⅳ为耕地

各生境中小型土壤动物密度、类群数季节动态为：次生针阔叶混交林 9 月中小型土壤动物密度显著高于 5 月和 7 月；次生落叶阔叶林生境中小型土壤动物密度 9 月显著高于 5 月（P<0.05）；蒙古栎林和耕地小型土壤动物密度季节动态趋势一致，但波动不大。蒙古栎林中小型土壤动物类群数 7 月显著高于 5 月和 9 月（P<0.05）；耕地生境中小型土壤动物类群数 5 月显著高于 9 月（P<0.05）（图 2）。从上述动态趋势可知，次生针阔叶混交林中小型土壤动物密度季节动态较显著而类群数波动不大；蒙古栎林生境中小型土壤动物类群数季节动态较显著，7 月的类群数显著高于其它两个月份；耕地生境中小型土壤动物的类群数季节波动较大，5 月份最多，9 月份最低。

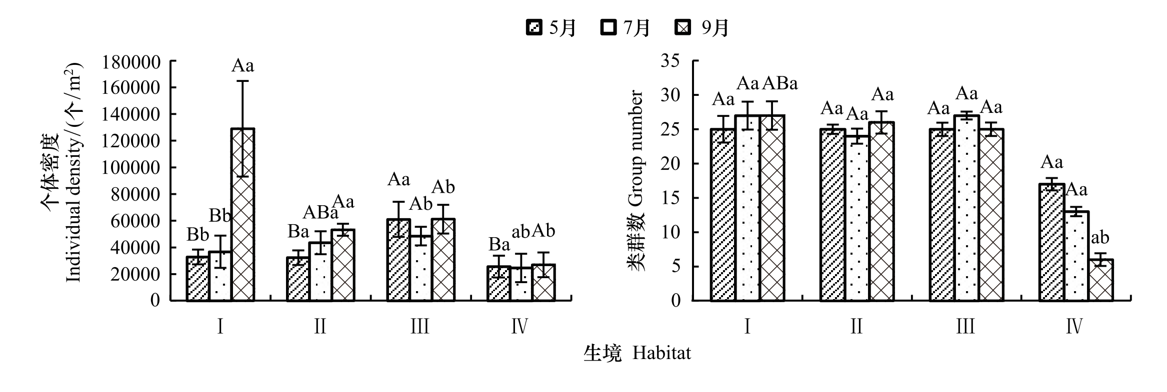


图 2 各生境中小型土壤动物密度与类群数动态

Fig.2 Dynamics of group number and density of meso-micro soil fauna in different habitats

3.2.2 土壤动物群落的多样性及其动态特征

如表 2 可知，各生境大型土壤动物多样性指数为：次生落叶阔叶林>次生针阔叶混交林>蒙古栎林>耕地，丰富度指数为：次生落叶阔叶林>次生针阔叶混交林>蒙古栎林>耕地；各生境中小型土壤动物多样性指数为：

次生落叶阔叶林>次生针阔叶混交林>蒙古栎林>耕地,丰富度指数为:次生落叶阔叶林>次生针阔叶混交林>蒙古栎林>耕地。总体看来,次生落叶林土壤动物的多样性最高,次生落叶阔叶林次之,耕地最低。

表 2　各生境土壤动物多样性特征指数

Table 2　Diversity indexes of soil fauna in different habitats

		生境Ⅰ Habitat Ⅰ	生境Ⅱ Habitat Ⅱ	生境Ⅲ Habitat Ⅲ	生境Ⅳ Habitat Ⅳ
大型土壤动物 Macro soil fauna	H'	1.83	1.86	1.77	1.19
	D	1.72	1.74	1.71	1.16
中小型土壤动物 Micro soil fauna	H'	1.68	1.80	1.39	0.93
	D	1.69	1.71	1.52	0.78

各生境大型土壤动物多样性指数动态变化表现为:次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林以及蒙古栎林多样性指数和丰富度指数季节动态不明显,而耕地多样性指数在春季和夏季具有显著性差异(P<0.05),多样性指数春季最大,夏季最少(图 3)。

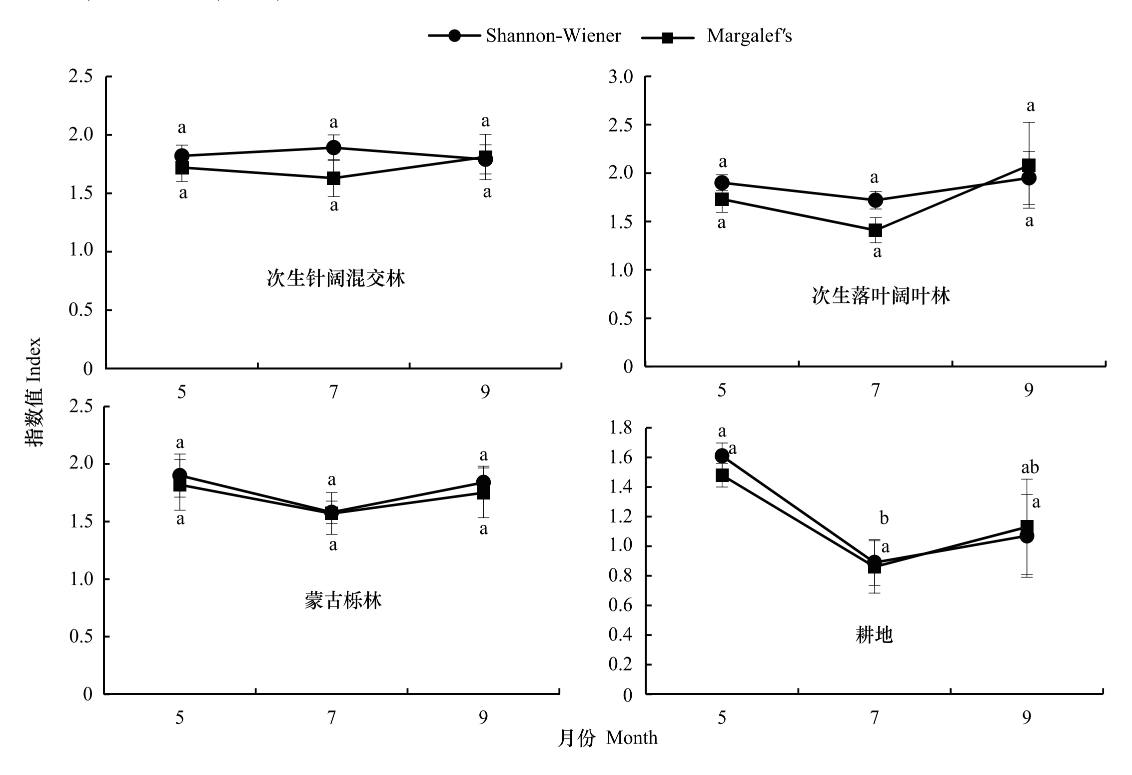


图 3　各生境大型土壤动物多样性指数季节变化

Fig.3　Seasonal changes of macro soil fauna diversity index in different habitats

各生境中小型土壤动物多样性指数动态变化如下:次生针阔叶混交林多样性指数春季、夏季与秋季动态变化较大(P<0.05),春季、夏季显著高于秋季;次生落叶阔叶林生境多样性指数春季和秋季具有显著性差异(P<0.05),春季多样性最高,秋季最低;蒙古栎林生境多样性指数春季、夏季和秋季具有显著性差异(P<0.05),丰富度指数春季与秋季之间具有显著性差异(P<0.05),秋季多样性指数和丰富度指数均低于春季、夏季;耕地生境多样性指数和丰富度指数春季、夏季显著高于秋季(P<0.05)(图 4)。

3.3　土壤动物群落对环境因子变化的响应

3.3.1　土壤动物对土壤温度、土壤湿度的响应

从表 3 中可以看出,大型土壤动物的密度、类群数与土壤温度具有显著正相关关系,这表明大型土壤动物类群数对土壤温度具有显著正向响应;与大型土壤动物相比,中小型土壤动物密度和类群数对土壤湿度的响

应程度更大,具有显著正向响应,也就是说随着土壤湿度的增加,中小型土壤动物的密度和类群数也具有增加趋势。

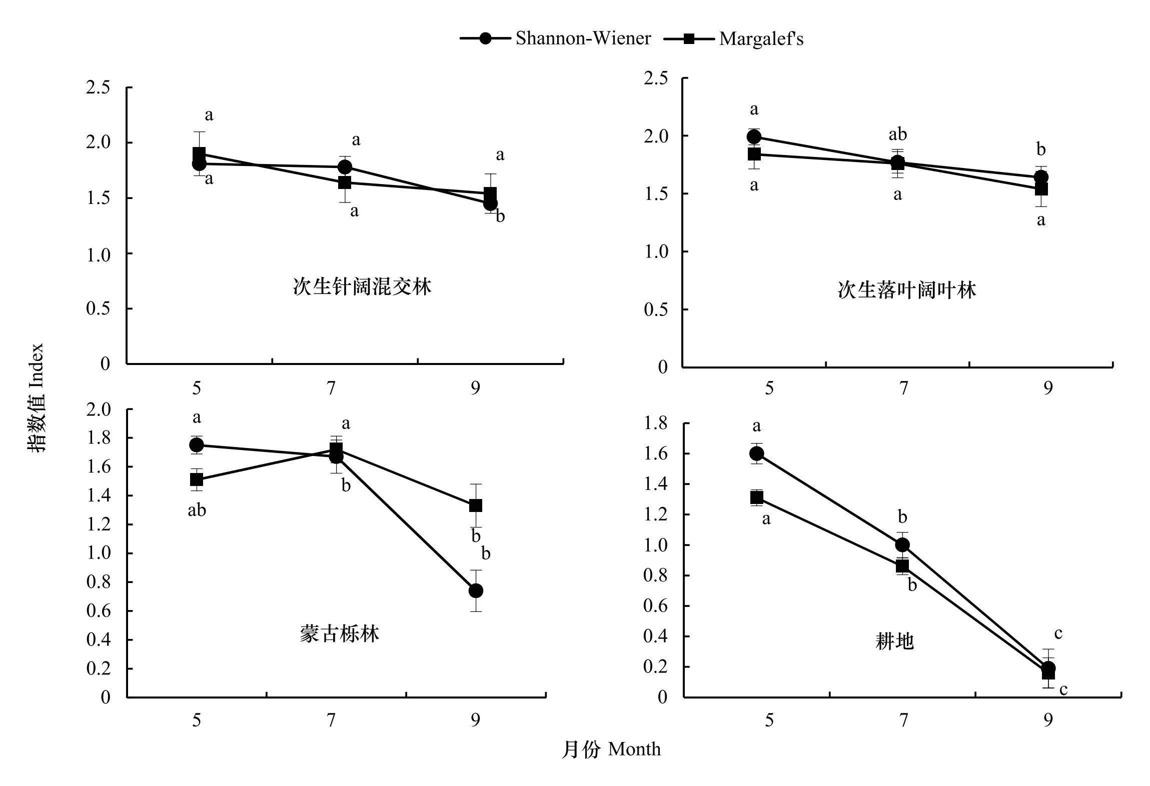


图 4 各生境中小型土壤动物多样性指数季节变化

Fig.4 Seasonal changes of meso-micro soil fauna diversity index in different habitats

表 3 土壤动物与土壤温度和土壤湿度的相关系数(n=12)

Table 3 The correlation coefficient of soil fauna, soil temperature and soil moisture

	大型土壤动物 Macro soil fauna		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	
	密度 Density	类群数 Group number	密度 Density	类群数 Group number
土壤温度 Soil temperature	067.523 *	0.679 *	0.113	0.124
土壤湿度 Soil moisture	0.240	0.358	0.426 *	0.421 *

* 表示相关系数达到 P<0.05 的显著相关; * * 表示相关系数达到 P<0.01 的极显著相关

3.3.2 土壤动物对 pH、有机质的响应

如表 4 所示,土壤动物与 pH 和有机质的相关分析表明,大型、中小型土壤动物的密度和类群数与 pH 的均具有正相关关系,但没有达到显著相关性,相比之下,对有机质的响应程度却很高,大型土壤动物密度、类群数均与有机质达到极显著正相关关系,中小型土壤动物的类群数也对有机质具有极显著正向响应。

表 4 土壤动物与 pH 和有机质的相关系数(n=12)

Table 4 The correlation coefficient of soil fauna, pH and organic

	大型土壤动物 Macro soil fauna		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	
	密度 Density	类群数 Group number	密度 Density	类群数 Group number
pH	0.527	0.402	0.208	0.461
有机质 Organic	0.814 **	0.735 **	0.492	0.854 **

3.3.3 土壤动物对全效养分的响应

通过对土壤动物与全效养分 N、P、K 的相关分析可以看出(表 5):大型土壤动物的类群数对 TN 具有极显著正向响应,密度和类群数均对 TP、TK 具有极显著负向响应,会随着 TP 和 TK 含量的增加而减少;中小型土

壤动物的类群数对 TN 也达到了显著的正向响应,密度和类群数对 TP 具有显著、极显著的负向响应,类群数与 TK 具有极显著的负向响应。可以看出,大型、中小型土壤动物对 TN 具有显著的正向响应,而对 TP、TK 却具有极显著的负向响应。

表 5　土壤动物与 TN、TP 和 TK 的相关系数($n=12$)

Table 5　The correlation coefficient of soil fauna and TN、TP、TK

	大型土壤动物 Macro soil fauna		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	
	密度 Density	类群数 Group number	密度 Density	类群数 Group number
总氮 TN Total nitrogen	0.471	0.710**	0.511	0.702*
总磷 TP Total phosphorus	−0.724**	−0.760**	−0.607*	−0.843**
总钾 TK Total potassium	−0.745**	−0.770**	−0.390	−0.818**

3.3.4　土壤动物对速效养分的响应

大型土壤动物与速效 N、速效 P、速效 K 的相关分析结果表明:大型土壤动物的密度对速效 N 具有极显著正向响应,对速效 P 具有极显著负向响应,密度和类群数均对速效 K 具有显著正向响应;中小型土壤动物的类群数对速效 N 具有显著正向响应,对速效 P 具有极显著负向响应,对速效 K 具有显著正向响应。从密度来看,与中小型土壤动物相比,大型土壤动物对速效 N、速效 P、速效 K 的响应程度更高,从类群数方面看来,中小型土壤动物对速效 N、速效 P、速效 K 高于大型土壤动物(表 6)。

表 6　土壤动物与速效 N、P 和 K 的相关系数($n=12$)

Table 6　The correlation coefficient of soil fauna and N、P、K

	大型土壤动物 Macro soil fauna		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	
	密度 Density	类群数 Group number	密度 Density	类群数 Group number
速效 N Available nitrogen	0.772**	0.458	0.317	0.627*
速效 P Available phosphorus	−0.708**	−0.558	−0.437	−0.865**
速效 K Available potassium	0.689*	0.641*	0.235	0.858**

3.3.5　土壤动物对矿质元素的响应

通过对土壤动物与矿质元素 Ca、Mg、Mn 的相关分析可知:大型、中小型土壤动物对 Ca、Mg 的响应程度不高,且响应的差异性较大,从密度来看,大型土壤动物对 Ca 具有正向响应,对 Mg 具有负向响应,中小型土壤动物与大型相反,从类群数来看,二者的响应程度一致,对 Ca 具有正向响应,对 Mg 具有负向响应。大型、中小型土壤动物对 Mn 的响应程度很高,大型土壤动物的密度、类群数对 Mn 呈现出显著负向响应,中小型土壤动物类群数也对 Mn 具有极显著负向响应(表 7)。

表 7　土壤动物与 Ca、Mg 和 Mn 的相关系数($n=12$)

Table 7　The correlation coefficient of soil fauna and Ca、Mg、Mn

	大型土壤动物 Macro soil fauna		中小型土壤动物 Meso-micro soil fauna	
	密度 Density	类群数 Group number	密度 Density	类群数 Group number
Ca	0.476	0.075	−0.207	0.180
Mg	−0.412	−0.299	0.019	−0.361
Mn	−0.609*	−0.698*	−0.347	−0.852**

4　结论与讨论

4.1　讨论

4.1.1　大型土壤动物对环境因子变化的响应

通过研究大型土壤动物与土壤温度、湿度之间相关分析表明,大型土壤动物对土壤温度、湿度具有正向响

应,尤其对土壤温度响应程度显著。本研究区大型土壤动物密度夏季最高,秋季以后密度开始下降,这与温带森林大型土壤动物的季节动态一致[16],与半干旱区研究结果不一致[17]。区域气候是影响土壤温度、湿度的直接因素,土壤温度与气温有关,土壤湿度与降雨量相联系[18]。长白山地低山区为典型的温带季风气候,春季随着气温的回升,栖息的大型土壤动物复苏[16],夏季高温期,大型土壤动物繁殖达到高峰期,此时密度达到最大,秋季随着土壤温度下降,部分土壤动物开始进入冬眠状态,成虫数量减少。耕地生境大型土壤动物的类群数和多样性指数春季最大,夏季最低,可能是与喷洒农药等有关。

研究区内大型土壤动物对 pH 具有正向响应。土壤动物对于长期生存的环境具有一定适应性,微酸和中性条件下土壤动物更适宜生存[19],而研究区内土壤的 pH 均属于酸性条件,可能在其耐受范围内会随着 pH 的增加而呈上升趋势。本研究表明,耕地生境土壤动物的密度及类群数显著低于其它 3 个生境,同时多样性指数和丰富度指数也最低。土壤动物的分布及其多样性与生境条件密切相关,其中有机质和 TN 是影响土壤动物生态分布和多样性的主要环境因子,一般来说具有正向影响[15,20],本文研究结果与其一致。土壤动物对有机质和 TN 具有显著正向响应,对 TP、TK 及 Mn 具有显著负向响应。主要是由于其它 3 个生境比耕地生境植被种类组成丰富,每年能向土壤系统中输入大量的凋落物,其分解能够为土壤动物提供食物、能量和栖息地,生境条件较好,同时耕地有机质和 TN 含量最低,TP、TK 及 Mn 的含量最高。大型土壤动物对 Ca、Mg 的响应程度不明显,对 Mn 具有极显著负向响应。张雪萍等对土壤动物与土壤营养元素的关系研究结果表明,土壤动物体内的微量元素与土壤环境的微量元素之间无显著相关性[14],这与本文研究结果不一致,Mn 是土壤动物所需的微量元素,如果超过土壤动物生存所需量,可能对 Mn 元素就表现出负向的响应。

4.1.2 中小型土壤动物对环境因子变化的响应

中小型土壤动物的密度对土壤湿度具有显著正向响应。中小型土壤动物密度季节动态与大型土壤动物差别很大,秋季密度高于春季、夏季,中小型土壤动物的密度、类群数与土壤湿度具有显著正相关关系,但本研究区夏季多雨期时中小型土壤动物却未达到最高,与大兴安岭北部森林生态系统内中小型土壤动物的季节动态一致[21],而与青藏高寒区[22]和半干旱区[4]研究结果不一致,可见不同气候系统下存在着差异。究其原因,可能是由于春季积雪融水补给较少且气温回升,而导致土壤湿度不高,夏季降水集中,土壤含水量达到饱和或者过饱和状态[21],中小型土壤动物由于迁移能力较弱,部分被直接淹死或因土壤中空气缺氧而死亡,因此在春季、夏季达到最低。而秋季时,土壤湿度最适宜,因此中小型土壤动物的密度达到最大。各生境中小型土壤动物的多样性指数春季、夏季显著高于秋季,这与某些类群有关,这些中小型土壤动物类群可能对高温多雨的环境响应更显著,更适于生活在这样的环境中。

通过研究发现中小型土壤动物对 pH 的响应程度不明显,对有机质具有极显著正向响应。究其原因,本研究区土壤 pH 一般在 4.53—5.50,且变化幅度不大,符合土壤动物的适宜生存条件[19],因此 pH 的变化并未对中小型土壤动物产生显著影响,所以中小型土壤动物也对 pH 变化的响应程度不明显。次生针阔叶混交林、次生落叶阔叶林生境土壤动物秋季显著多与春夏季就与土壤有机质含量较高有关。中小型土壤动物对全效养分(TN、TP、TK)与速效养分(速效 N、速效 P、速效 K)的响应程度很高,有相关研究表明土壤动物个体数与类群数增加与速效 N、速效 K 的含量高有关,而速效 P 的含量对土壤动物的分布无明显影响[23]。可能是由于生境不同,中小型土壤动物类群具有一定的差异性,不同种类的土壤动物对速效 P 的响应程度具有差别。中小型土壤动物的密度对 Ca、Mg、Mn 的响应程度不明显,类群数对 Mn 极显著负向响应。这与大型土壤动物对 Ca、Mg、Mn 的响应一致,耕地生境土壤动物的密度和类群数低于其他 3 个生境可能也与该生境内 Mn 的含量较高有关。

4.2 结论

(1)长白山地低山 4 个生境土壤动物组成具有一定的差异性,总体看来耕地生境条件最差,土壤动物群落结构最简单。各生境土壤动物的季节变化不同,大型土壤动物的密度季节变化较显著,中小型土壤动物的密度和类群数的季节波动均较大。

(2)次生落叶阔叶林生境土壤动物群落多样性指数和丰富度指数均高于其它 3 个生境,耕地生境最低。中小型土壤动物多样性指数、丰富度指数季节波动较大,春季、夏季与秋季之间差异性较大,大型土壤动物季节波动较小。

(3)土壤动物的密度和类群数能够对环境因子变化做出相应的响应,通过对土壤动物与 13 种环境因子进行 Pearson 相关分析可知,大型和中小型土壤动物对环境因子的响应程度不同。大型土壤动物密度、类群数对土壤温度的响应程度较高,具有正向响应,中小型土壤动物的密度、类群数对土壤湿度具有显著正向响应;大型和中小型土壤动物对 pH 的响应程度较低,对有机质具有显著正向响应;大型和中小型土壤动物对全效养分(TN、TP、TK)以及速效养分(N、P、K)的响应程度高,对 Ca、Mg 的响应程度较低,对 Mn 具有很高的负向响应。

(4)中小型土壤动物对土壤湿度的响应程度高于大型土壤动物,而对土壤温度的响应大型土壤动物更明显;大型、中小型土壤动物度对 pH 的响应程度均不明显,而对有有机质的响应程度较高;大型土壤动物密度对速效养分的响应程度高于中小型土壤动物,而从类群数方面比较,中小型土壤动物则更高;大型土壤动物密度对 Mn 的响应程度高于中小型土壤动物。

参考文献(References):

[1] 殷秀琴, 刘继亮, 高明. 小兴安岭森林生态系统中营养元素关系及土壤动物的作用. 地理科学, 2007, 27(6): 814-819.

[2] Collison E J, Riutta T, Slade E M. Macrofauna assemblage composition and soil moisture interact to affect soil ecosystem functions. Acta Oecologica, 2013, 47: 30-36.

[3] Vasconcellos R L F, Segat J C, Bonfim J A, Baretta D, Cardoso E J B N. Soil macro fauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. European Journal of Soil Biology, 2013, 58: 105-112.

[4] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 半干旱区草地土壤动物多样性的季节变化及其与温湿度的关系. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 97-101.

[5] Suthar S. Seasonal dynamics in earthworm density, casting activity and soil nutrient cycling under Bermuda grass (*Cynodon dactylon*) in semiarid tropics, India. The Environmentalist, 2012, 32(4): 503-511.

[6] Salehi A, Ghorbanzadeh N, Kahneh E. Earthworm biomass and abundance, soil chemical and physical properties under different poplar plantations in the north of Iran. Journal of Forest Science, 2013, 59(6): 223-229.

[7] Hasegawa M. The relationship between the organic matter composition of a forest floor and the structure of a soil arthropod community. European Journal of Soil Biology, 2001, 37(4): 281-284.

[8] Loranger-Merciris G, Imbert D, Bernhard-Reversat F, Ponge J F, Lavelle P. Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi−evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(2): 269-276.

[9] 肖玖金, 张健, 杨万勤, 黄玉梅, 杨鲁, 李纪伟, 严妲. 巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤动物群落对采伐干扰的初期响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4531-4539.

[10] Yin X Q, Song B, Dong W H, Xin W D, Wang Y Q. A review on the eco-geography of soil fauna in China. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(3): 333-346.

[11] Sapkota T B, Mazzoncini M, Bàrberi P, Antichi D, Silvestri N. Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(4): 853-863.

[12] Jongmans A G, Pulleman M M, Balabane M, van Oort F, Marinissen J C Y. Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earthworm activity. Applied Soil Ecology, 2003, 24(3): 219-232.

[13] Schwarz B, Dietrich C, Cesarz S, Scherer-Lorenzen M, Auge H, Schulz E, Eisenhauer N. Non-significant tree diversity but significant identity effects on earthworm communities in three tree diversity experiments. European Journal of Soil Biology, 2015, 67: 17-26.

[14] 张雪萍, 李春艳, 殷秀琴, 陈鹏. 不同使用方式林地的土壤动物与土壤营养元素的关系. 应用与环境生物学报, 1999, 5(1): 26-31.

[15] 林英华, 张夫道, 杨学云, 宝德俊, 石孝均, 王胜佳, 王伯仁. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究. 中国农业科学, 2004, 37(6): 871-877.

[16] 李娜, 张雪萍, 张利敏. 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态. 生态学报, 2013, 33(19): 6236-6245.

[17] 刘任涛, 朱凡. 半干旱区草地生境中大型土壤动物群落季节动态. 生态环境学报, 2013, 22(1): 72-77.

[18] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利顶, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448.

[19] 钱复生, 王宗英. 水东枣园土壤动物与土壤环境的关系. 应用生态学报, 1995, 6(1): 44-50.

[20] 刘继亮, 殷秀琴, 邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 130-136.

[21] 黄丽荣, 张雪萍. 大兴安岭寒温带地区中小型土壤动物群落特征. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 388-393.

[22] 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 崔丽巍, 何先进, 熊远清. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化. 生态学报, 2011, 31(15): 4385-4397.

[23] 张俊霞, 刘贤谦. 太谷县枣园土壤动物与土壤养分的关系. 山西农业大学学报, 2005, 25(1): 8-1.